

Comparación de Capacidad y parámetros representativos entre el tramo en carril-bus de la línea 27 (EMT, Madrid-España) y Sistema Trolebús (Mérida-Venezuela)

Emilio G. Moreno González
ETSI Caminos, UPM, España
Manuel G. Romana y Oscar Martínez Álvaro
Titular de Universidad, UPM, España

RESUMEN

El presente artículo compara las características más importantes en cuanto a Capacidad y parámetros representativos de dos líneas en plataforma reservada de autobús de características diferentes, como son la línea 27 de la EMT y la única línea en servicio de Trolmérida. Para ello se desarrolla la metodología descrita en el *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)* que determina la capacidad de transportación en sistemas con distinta infraestructura y grado de reserva de su plataforma. El trabajo es parte de un proyecto más amplio para analizar la influencia de diversos grados de reserva de plataforma en las características operativas de las líneas de autobuses.

Se da inicio al estudio de una gama de sistemas de transporte, enfocando el análisis en el carril-bus de Línea 27, autobuses articulados convencionales con alto índice de ocupación gestionados por la Empresa Municipal de Transporte (EMT) Madrid-España y, el Sistema de Transporte Trolebús (STT) conocido como "Trolmérida", principal medio de transporte colectivo de la ciudad de Mérida-Venezuela, provisto de autobuses articulados con tracción bi-modal (eléctrica-gasol) impulsados fundamentalmente por troles conectados a catenaria.

Ambos sistemas muestran similitud respecto al material rodante, con diferencias notables en cuanto a infraestructura, operatividad en paradas y condiciones de tráfico. En consecuencia, se establece un contraste de la capacidad y sus parámetros representativos gracias a la aplicación de una metodología de campo que permite, con un soporte estadístico eficiente, la cuantificación robusta de la capacidad teórica y su elasticidad frente a sus variables más influyentes como la demora por parada y control de tráfico preexistente.

En el proceso de captación de los parámetros se aplican técnicas de campo sencillas donde destaca el uso de herramienta telemática de posicionamiento global GPS en la determinación de la velocidad ofertada por cada sistema, datos en correspondencia con otras variables tomadas *in situ* en forma simultánea.

1. INTRODUCCION

Los sistemas de transporte por autobús analizados constituyen parte de una gama más amplia que puede darse bajo distinto tipo de infraestructura. Cada uno, representa un grupo particular de sistemas y, contienen en si mismo, tramos de distinta características que influye en el desempeño general. En concreto, se establece un contraste entre los parámetros operativos importantes que definen la calidad de servicio y la capacidad teórica de transportación.

La metodología empleada para la captación de los datos consiste por un lado, en el registro manual de los tiempos de demora en todo el proceso durante el recorrido a bordo del vehículo y, por otro, el uso de tecnología GPS para la captación telemática del parámetro velocidad en forma simultánea, considerando un número mínimo de recorridos necesarios según el análisis estadístico exploratorio. La metodología de cálculo utilizada para la estimación de la capacidad teórica, en ambos casos, sigue lo dispuesto en el *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)*, metodología que es ajustada, considerando el comportamiento observado de la demora en parada que permite definir la elasticidad de la capacidad frente a sus parámetros más influyentes. En suma, se precisa el intervalo razonable entre vehículos que es asociado a un rango de capacidad de transportación, se determinan los parámetros representativos de desempeño y, se sugieren mejoras como consecuencia de los análisis.

2. CARACTERIZACION DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE ANALIZADOS

En cuanto al nivel de infraestructura disponible en cada Línea de transporte analizada, se consideran los aspectos más influyentes en la capacidad como son: tipo de segregación, colección de tarifa, operación y control. Véase la Tabla 1.

Infraestructura disponible	Sistema de transporte
Segregación del carril mediante balizas, señalización horizontal y/o plataforma semi-reservada + intersecciones. Pago adentro y ascenso principalmente por puerta delantera	Línea 27 (EMT Madrid)
Plataforma 100% reservada + intersecciones. Pago afuera, ascenso/descenso por todas las puertas	Línea 1 (STT Mérida-Vzla)*

* Sistema que se presenta como antecedente al análisis comparativo

Tabla 1 – Infraestructura disponible en los sistemas de transporte analizados

Por otra parte, la capacidad depende del tamaño del autobús utilizado y forma de conducción, refleja la interacción entre la concentración de pasajeros y el flujo de tráfico, también depende de las políticas de operación como frecuencia de servicio y pasajeros admitidos. Generalmente, está limitada por: el área de carga donde suben/bajan pasajeros; el número de vehículos involucrados en la operación y; la distribución de subidos/bajados a lo largo del recorrido. La figura 1 muestra el diseño típico y alternativa de emplazamiento de parada en las Líneas

analizadas. Una configuración lineal de parada simple, anterior y próxima a un semáforo, es más común en ambos sistemas, con muy pocas excepciones.

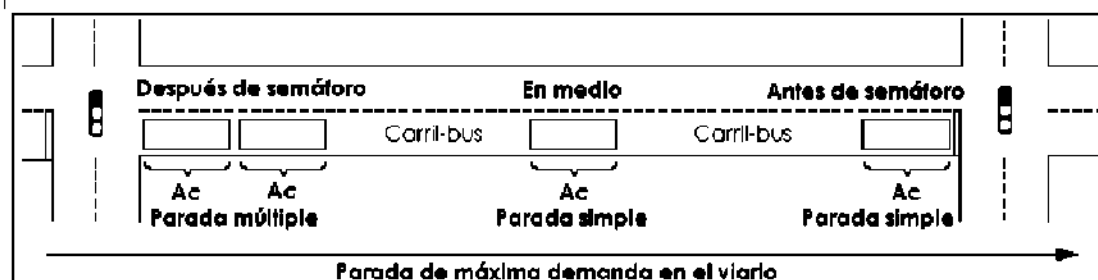


Fig. 1 – Diseño lineal y distinto emplazamiento de parada en las Líneas analizadas

De esta manera, la capacidad puede calcularse en tres elementos claves: en el área de carga; en la parada (conformada por una o más áreas de carga) y; en el viario (con cierto número de paradas en el recorrido). La capacidad en el área de carga depende de la demora en parada, el tiempo de despeje, la variabilidad de la demora y, la probabilidad de ocupación del área de carga (o tasa de fallo). En la parada, es función de la capacidad en cada área de carga que la conforma, es decir, número efectivo de áreas de carga; diseño de la parada y; control de tráfico que puede llegar a ser más restrictivo en la cantidad de autobuses que salen o entran a una parada durante un periodo de tiempo dado. Y en el viario, la capacidad está condicionada por aquella parada con más baja capacidad, máxima demanda (o demora), que limita el número de autobuses que puede pasar.

De los factores de influencia principales en la demora observada, dos se relacionan con la demanda y el resto con el tiempo de servicio en la parada, entre ellos pueden citarse: la demanda de pasajeros; espaciamiento entre paradas; proceso de pago; acceso a nivel y, densidad de pasajeros abordo. Otro aspecto importante, que guarda cierta similitud entre ambos sistemas constituye el tipo de vehículo utilizado como modo de transporte. Véase la Figura 2.

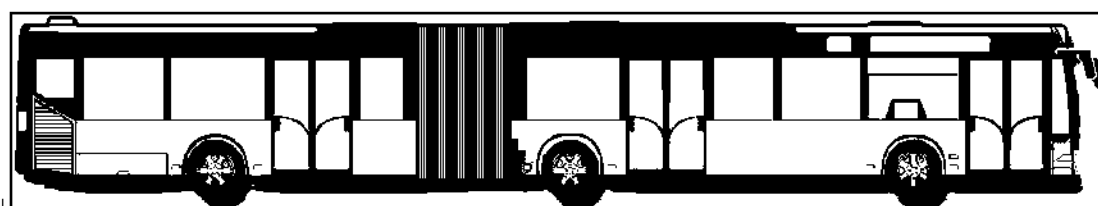


Fig. 2 – Autobús articulado de Línea 27 (EMT), muy similar al modo usado en el STT

2.1 Características más específicas del Carril-bus, Línea 27 (EMT)

Esta Línea une dos puntos claves de gran movilidad en el centro de Madrid (Glorieta de Embajadores y Plaza de Castilla) que determina el eje Prado-Recoletos-Castellana, corredor con longitud aproximada de 8,1 km en el sentido Plaza de Castilla y de 7,8 km en el sentido

contrario. Presenta plataforma en condición semi-reservada con carril segregado mediante tres elementos físicos: bordillos, balizas y señalización horizontal con pintura. Según lo observado, constituye un carril vulnerable de invasión por otros vehículos y la circulación es afectada notoriamente por semáforos en intersecciones de gran afluencia. El pago se realiza abordo mediante validación mecánica del billete y la Línea cuenta con alto índice de ocupación generado por una demanda importante de 1344 viajeros en hora punta y sentido (según Informe CRTM, 2007-2008), lo que facilita la estimación precisa del comportamiento de la demora en paradas. La Figura 3 muestra el esquema operativo en parada y refleja mayor proporción de pasajeros subidos por la puerta delantera como consecuencia de establecer un control eficiente del pago. En general, las paradas se localizan a un espaciamiento medio de 300 m, con paradas que están en correspondencia con otros sistemas de transporte de alta capacidad como el Metro de Madrid y trenes Cercanías.



Fig. 3 – Esquema operativo en parada de Línea 27 (EMT)

2.2 Características específicas del Carril-bus, Línea 1 (STT)

El sistema trolebús de Mérida-Venezuela está constituido por autobuses articulados que transitan en carril totalmente reservado con infraestructura tranviaria. Su similitud en cuanto al modo de transporte pone en relieve aspectos como: colección de tarifa (fuera del vehículo), uso plataforma en condición reservada y, diseño avanzado de paradas. La descripción en detalle de este sistema híbrido autobús-tranvía puede ser consultada (Moreno et al., 2008). Análogamente, un esquema de parada típica es mostrado en la Figura 4.

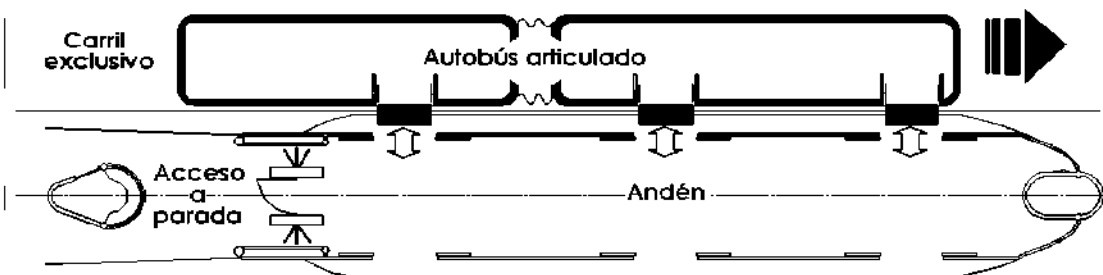


Fig. 4 – Esquema de parada típica de Línea 1 (STT)

En la Figura 4, se aprecia dos (2) torniquetes en el acceso para control de tarifa antes de

abordar al vehículo; acceso fácil para persona discapacitada e infraestructura cerrada que permite la distribución de pasajeros por todas las puertas en forma simultánea. El tiempo de servicio es constantemente controlado y la conexión andén-vehículo se da mediante rampas retráctiles que garantizan un acceso a nivel. Su diseño en isleta central entre carriles admite el aparcamiento de un vehículo por sentido sin posibilidad de adelantamiento y las paradas se localizan a una distancia media de 731 m en un corredor de longitud aproximada de 10,3 km.

3. METODOLOGÍA APLICADA

De la revisión del estado del arte sobre distintas metodologías disponibles para el cálculo de la capacidad se tiene como más difundida y, mejor sustentada científicamente, la resumida en Kettilson et al. (2003). Allí se presenta un modelo de capacidad analítico tipo determinista desarrollado mediante cierta componente probabilística que es incorporada a la expresión matemática originaria para mejorar la estimación, considerando la variabilidad de la demora y la probabilidad de parada ocupada (Jacques and Levinson, 1997). En general, el análisis planteado se desarrolla en cuatro fases a saber: la captación de los datos *in situ*; su procesamiento y organización para estimar los factores y parámetros de mayor influencia; el análisis estadístico y; la evaluación de los resultados alcanzados. En el apartado siguiente se describe en forma sucinta la metodología de cálculo aplicada.

3.1 Metodología de cálculo

El citado modelo analítico permite evaluar la capacidad de sistemas de transporte por autobús, tanto si se presenta o no, una condición de plataforma reservada, lo que permite su aplicabilidad en cualquier caso. Constituye un modelo matemático basado en el concepto de intensidad de tráfico que puede pasar por un punto de la infraestructura, difundido inicialmente por el Highway Capacity Manual (HCM, 1985 y 1994), y que posteriormente fue ajustado considerando la variabilidad de la demora en parada “Cv”; la probabilidad de parada ocupada (tasa de fallo) “Za”; el efecto de semáforo próximo “g/C” y; otros factores empíricos que son simplificados por no presentarse este tipo de afectaciones en campo. De esta forma, la capacidad en el carril-bus puede ser obtenida mediante la Ecuación (1). Los parámetros “dp” y “td” representan la demora media y el tiempo de despeje medio en parada, respectivamente.

$$C_{cb} = \frac{3600(g/C)}{t_d + (g/C)d_p + (Z_a C_v d_p)} \quad (1)$$

4. COMPORTAMIENTO DE LA DEMORA EN PARADA

En Línea 27 (EMT) se determina un modelo potencial con coeficiente de determinación $r^2 = 0,88$ en pasajeros subidos, representando la demora máxima utilizada para estimación de la capacidad. En Línea 1 (STT) un modelo cuadrático de demora total por subidos/bajados con coeficiente de determinación $r^2 = 0,81$ resulta el mejor ajuste. Véase la Figura 5.

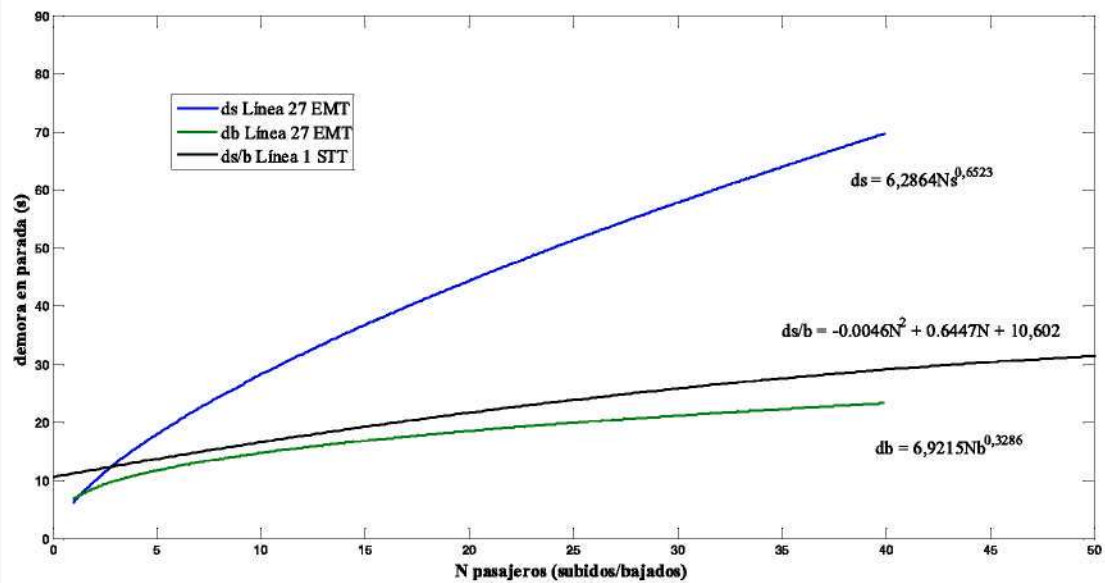


Fig. 5 – Demora observada en parada de Línea 27 (EMT) y Línea 1 (STT)

5. DESEMPEÑO DE LA VELOCIDAD

En el sentido Pza. Castilla-Gta. Embajadores de Línea 27 (EMT) la velocidad muestra un comportamiento uniforme con valor medio de 14 km/h. En sentido contrario Gta. Embajadores-Pza. Castilla, la velocidad es discriminada aplicando análisis cluster a los datos obtenidos por el receptor GPS y, el valor medio es de 13,22 km/h. Este resultado se muestra en la Figura 6.

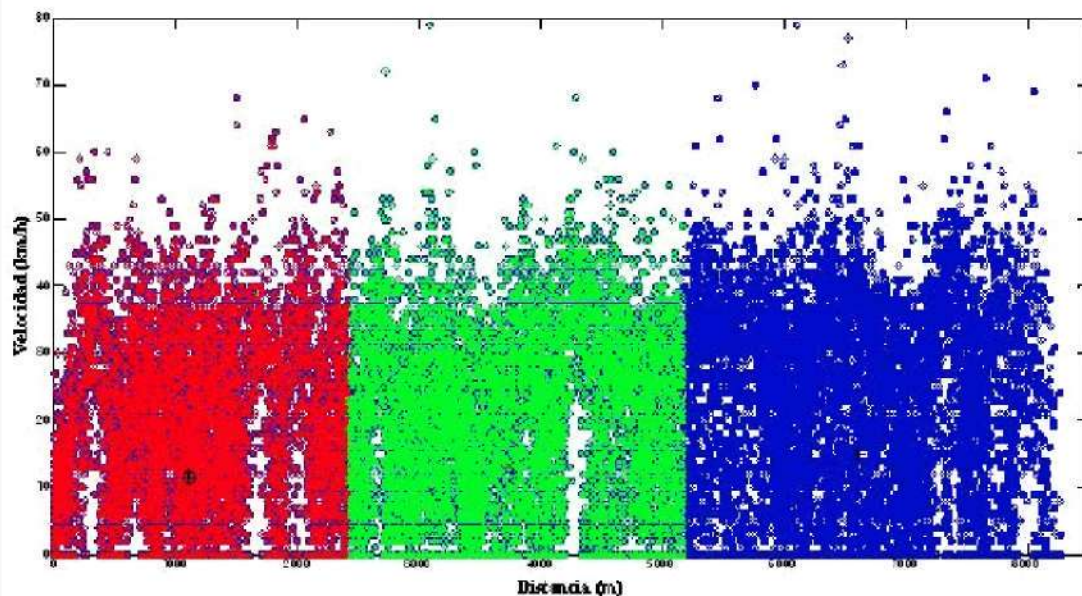


Fig. 6 – Velocidad en sentido Gta. Embajadores - Pza. Castilla de Línea 27 (EMT)

En ambos sentidos de Línea 1 (STT) la velocidad de recorrido resulta similar con valor medio de 19 km/h. El análisis cluster de datos GPS determina cuatro tramos de comportamiento homogéneo en el sentido más desfavorable, Terminal Sur-Pie del Llano. Véase la Figura 7.

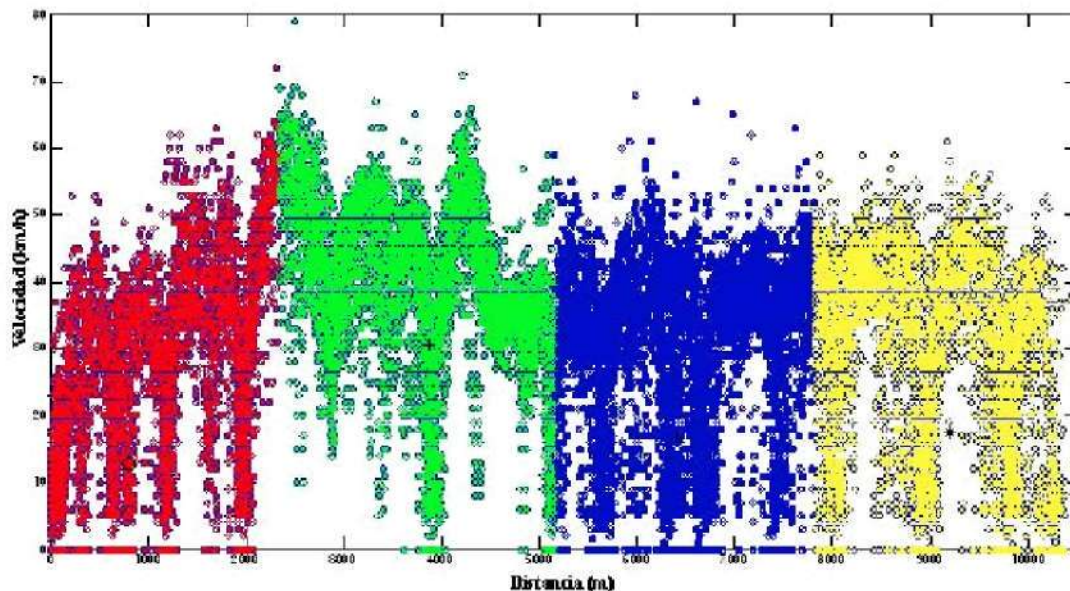


Fig. 7 – Velocidad en sentido Terminal sur - Pie del Llano de Línea 1 (STT)

6. CAPACIDAD TEORICA ALCANZADA

La figura 8 muestra la elasticidad de la capacidad en las distintas infraestructuras analizadas. Se estima la afectación por semáforo en el caso de Línea 27 (EMT) por ser ésta determinante y, los efectos de tráfico deben ser considerados si se quiere estimar la capacidad operativa que se encuentra por debajo de la capacidad teórica señalada. En el caso de Línea 1 (STT), la eliminación de rampas de acceso al vehículo permite incrementar su capacidad a 73 veh/h/c.

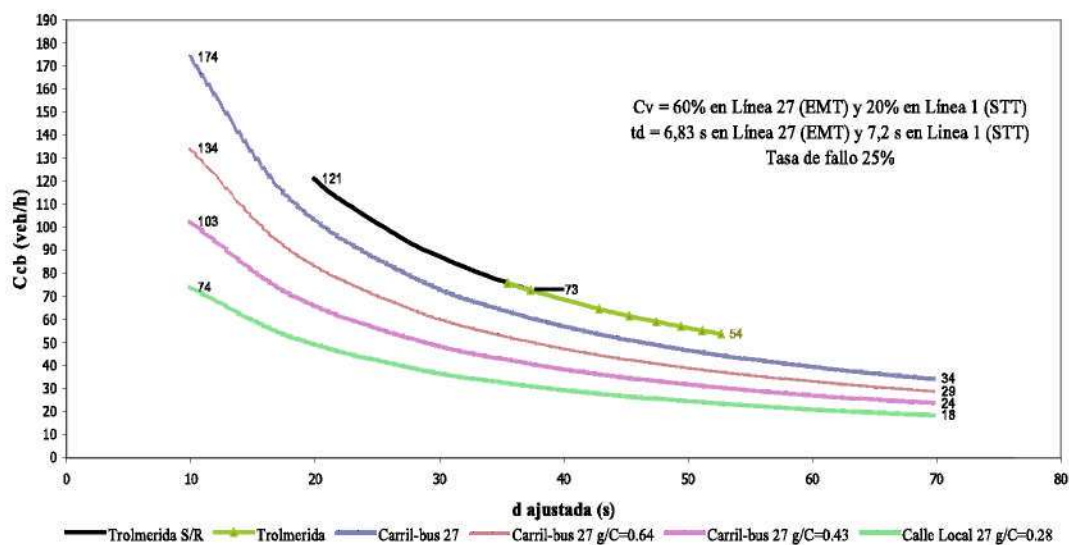


Fig. 8 – Capacidad en distinta infraestructura de Línea 27 (EMT) y Línea 1 (STT)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las pruebas de diagnóstico sobre el modelo de pasajeros subidos y bajados requieren transformación de los datos para confirmar su validez en Línea 27 (EMT).
2. El valor medio de la demora en parada de Línea 27 (EMT) es inferior al caso de Línea 1 (STT), en concreto 20,41 s versus 37 s. Sin embargo, se tiene mayor dispersión con coeficiente de variabilidad de 0,60.
3. Las afectaciones por semáforo al momento de salir disminuye notoriamente la capacidad del carril-bus 27, un valor de 34 veh/h/c resulta como valor máximo a un intervalo de 69,41 s en carril-bus 27, inferior al encontrado en Línea 1 (STT) de 54 veh/h/c.
4. Los datos de velocidad tomados con el receptor GPS demuestran un desempeño superior en el caso de Línea 1 (STT).
5. Si se implementa medida sustitutiva de acercamiento entre vehículo-andén en Línea 1 (STT), aumenta notoriamente su capacidad de transportación a 74 veh/h/c.
6. Estudiar la conveniencia de aumentar el grado de reserva y controlar el efecto nocivo de invasión por otros vehículos en Línea 27 (EMT), en el caso de Línea 1 (STT) se requiere sólo implementar un buen plan de prioridad semafórica.
7. En paradas destinadas a distinta línea de transporte en Línea 27, puede funcionar mejor si se establece única parada donde los vehículos aparken en orden de arribo.
8. La coordinación de semáforos es imposible de no cumplirse un tiempo de recorrido previsible entre paradas de Línea 27 (EMT).
9. Evaluar la posibilidad de pasar a un sistema de captación de tarifa sin contacto, lo que permitiría agilizar la demora en “subidos” para el caso de Línea 27(EMT).

REFERENCIAS

- CONSEJERIA DE TRANSPORTES. *Madrid 2007-2008 referente mundial*. Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM). Abril 2008. pp 16-19
- KITTELSON & ASSOCIATES, INC. (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)*. 2nd Edition. Transit Cooperative Research Program. TRB. Washington. D.C.
- MORENO, E., MARTINEZ, O. y ROMANA, M. (2008). Caracterización de un sistema de transporte trolleybus en plataforma reservada. *Congreso de Ingeniería de Transporte, 2-4 Julio 2008*, ponencia 151. A Coruña. España.
- TRB (1985 y 1994). *Highway Capacity Manual*. Special Report 209, National Research Council, Washington D.C.